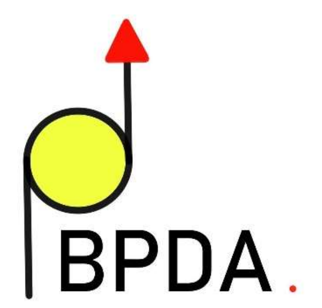


PHYSIQUE GÉNÉRALE

LA PLASTICITÉ DE LA GLACE

PIOTR ALEXEÏEVITCH KROPOTKINE

I.

Qui ne connaît de nos jours ces rivières de glace – les glaciers, ou les « glacières », comme disaient nos grands-pères – qui descendent du commet des Alpes jusque dans les vallées riantes, couvertes de prairies et de forêts, et qui nous apportent, sous forme de glace transparente, dure et cassante, la neige qui s'abat sur les cimes et dans les cirques des géants rocheux ? Nous ne sommes plus à l'époque de Saussure, où l'on considérait comme un exploit scientifique l'audace de fouler le blanc tapis des Alpes ou les *seracs* de leurs glaciers. Chaque année, des nuées de touristes, fuyant l'air empesté des villes, s'abattent sur les hautes vallées de la Suisse, escaladent ses pics, remontent ses rivières glacées, encadrées de noirs rochers, admirent les grottes azurées d'où prennent naissance nos grands fleuves. Les descriptions des glaciers forment toute une bibliothèque, la photographie multiplie à l'infini leurs images, et l'architecture de certains d'entre eux nous est aussi familière que celle des grandes villes du globe, tandis que des levés et des mensurations exactes nous représentent sous tous leurs aspects les mouvements complexes de ces cascades de glace, leur structure intime, l'action qu'elles exercent sur les rochers voisins.

Nous connaissons très bien les glaciers ; mais il n'en est pas de même des causes de leur mouvement. Celles-ci, discutées depuis près d'un siècle, restent encore l'objet des plus vives polémiques. On sait comment cette question passionna, il y a quarante ans, les grands savants de l'époque : Forbes, Agassiz, Charpentier, Desor, Hopkins, Whewell. Vingt ans plus tard, la discussion, soulevée de nouveau par Tyndall, se réengagea presque avec la même ardeur : Helmholtz, Thomson, Ball, Moseley, Croll, Heim, Pfaff, Bianconi, et tant d'autres y prirent part. Mais cette fois-ci encore la polémique se termina de guerre lasse, sans que cette question importante de la physique du globe fût résolue. Si bien qu'aujourd'hui celui qui n'a pas eu l'occasion de relire les mémoires entassés sur la question est encore à se demander quelle est la vraie cause du mouvement des glaciers ?

Admettrons-nous, en effet, avec Rendu et Forbes, que la glace des glaciers est un corps doué d'une certaine plasticité, qu'elle se moule facilement aux sinuosités de son lit et s'épanche dans les vallées selon les lois de l'écoulement des corps semi-liquides ? Ou bien admettrons-nous, comme le veut M. Tyndall, que la glace est presque dénuée de plasticité ; que le peu de plasticité qu'elle possède en commun avec tous les corps solides est absolument insuffisant pour expliquer l'écoulement des glaciers ; qu'elle se brise continuellement sous les tensions qu'elle subit ; mais qu'en revanche ses fragments se ressoudent dès qu'ils sont mis en contact, et nous font croire à la plasticité là où il n'y a au fond que « brisement et regélation » ? Ou bien encore, chercherons-nous les causes du mouvement des glaciers, avec M. Thomson, dans la liquéfaction des molécules de la glace, lorsque sa température est près de zéro, et lorsqu'elle est soumise à une certaine pression ? ou bien dans la liquéfaction successive des molécules qui se déplacent ainsi à l'état liquide – comme le suppose M. Croll, -- transmettant immédiatement leur chaleur et liquéfiant les molécules suivantes ? Enfin, ne donnerons-nous pas à la liquéfaction de la glace, sous les pressions qu'elle subit, le rôle moins important, mais toujours essentiel, que lui attribue M. John Ball ?

D'autre part, quelle que soit la cause intime qui permet aux amas de glace de se mouler sur le lit des vallées dont ils suivent la pente, aurons-nous recours simplement à la pression des névés et à la pesanteur pour expliquer le mouvement de descente des glaciers ? ou bien, comme le veut M. Moseley, sera-ce dans les allongements dus à la température et dans cette espèce de mouvement rampant (*crawling*), si manifeste dans les toitures de plomb, que nous chercherons la force nécessaire ? ou bien encore, dans l'eau qui d'infiltre dans le glacier et dans la pression qu'elle exerce, soit en se congelant, comme le pense M. Grad, soit en transmettant la pression hydrostatique, comme le supposaient les premiers explorateurs du monde glaciaire ? Voilà les questions qui se posent dès que nous cherchons à nous rendre compte de ce fait, si bien étudié en lui-même, mais dont la cause, ou les causes, nous échappent encore après quarante ans de discussions et d'études.

Un aperçu rapide des diverses hypothèses émises sur ce sujet et de leur filiations historique nous permettrait certainement d'établir avec plus de netteté les conditions du problème, en même temps qu'il en faciliterait la solution. Mais je dois forcément restreindre mon sujet, je me bornerai donc à analyser deux hypothèses seulement, toutes deux en rapport

immédiat avec la question de la plasticité de la glace : celle de Forbes qui affirme cette propriété, et celle de M. Tyndall, qui la considère comme insuffisante pour expliquer le mouvement des glaciers. Un aperçu des idées émises par M. Hopkins me servira de lien entre ces deux hypothèses opposées. Je passe ainsi sous silence de ce siècle sur le glissement des glaciers en bloc. Je ne m'arrête même pas à ces brillantes recherches de Charpentier, Desor, Agassiz et Charles Martins, auxquelles nous devons, pour ainsi dire, la découverte de tout un monde glaciaire.

On sait d'ailleurs ce que nous apportèrent ces recherches. L'adaptation parfaite des glaciers à leurs sinueux et mamelonnés d'aspérités ; la mobilité de leurs parties, se mouvant dans chaque point du glacier avec des vitesses inégales ; l'accélération du centre du glacier et le mouvement ralenti de ses bords, pareils à ce que nous voyons dans une rivière ; l'épanchement des glaciers en éventail à la sortie des gorges ; leur division, à la rencontre d'un îlot, en deux bras qui viennent se ressouder en aval de l'obstacle ; -- voilà ce qui fut établi si brillamment par les recherches laborieuses et les mensurations exactes des savants que je viens de nommer.

Devant ces faits, l'hypothèse du glissement en bloc, en faveur jusque-là auprès des physiciens, devenait insoutenable. Celle de Hugi et de Charpentier, provisoirement acceptée par Desor et Agassiz, qui essayait d'expliquer la plasticité des glaciers par la pression de l'eau dont ils sont imbibés, ou sa congélation dans les fissures, fut aussi reconnue insuffisante. Les faits observés amenaient forcément à supposer une certaine plasticité dans la glace elle-même. Ainsi l'hypothèse qui rallia le plus grand nombre de suffrages fut celle qu'avait préconisée jadis Rendu ; celle qu'à développée Forbes, sous le nom de « théorie du mouvement visqueux des glaciers ».

II.

L'hypothèse de Forbes est assez connue, du moins de nom ; mais elle a subi tant d'interprétations fausses, et les mémoires originaux de Forbes sont si peu accessibles à la grande masse des lecteurs, qu'il sera bon de l'exposer ici dans ses propres termes[1].

Suivant le physicien écossais, le mouvement plastique des glaciers s'explique en admettant que les grandes masses de glace, lorsque leur température est voisine de zéro, ont les propriétés des demi-fluides visqueux. Lorsque le volume d'un corps de ce genre a atteint une certaine épaisseur, ses molécules, sous la pression exercée par le corps lui-même, glissent les unes sur les autres conformément aux lois de l'écoulement des liquides. Comme exemple, Forbes indiqua d'abord les mouvements du même genre qui se produisent dans le miel ou dans la poix ; mais comme cette comparaison suscitait des objections inutiles, il se borna ensuite à comparer le glacier à une masse d'argile plastique qui se déverserait dans une vallée, ou bien encore, -- comme l'avait déjà fait observer Darwin – à une coulée de lave.

« Quelques imparfaits – disait-il – que soient nos connaissances sur le mécanisme des liquides imparfaits, nous pouvons cependant tirer parti de ce que nous connaissons à cet égard et affirmer que les faits mécaniques sont identiques dans les deux cas (écoulement d'un liquide imparfait et écoulement d'un glacier). Le mouvement est le résultat des pressions intérieures qui ont pour origine le poids même de la masse et qui se transmettent en partie, ou pour la plupart, comme la pression hydrostatique se transmet dans un corps dont les molécules peuvent être déplacées par rapport les unes aux autres (sous l'influence de cette force que Th. Young appelle *force détrusive*, et qui sert à vaincre ce qu'on désigne dans les liquides sous le nom de frottement). Sous l'influence de cette force, les points adjacents du corps acquièrent des vitesses différentes, et ces vitesses augmentent à la surface et dans les parties médianes de la masse, et diminuent sur ses bords et dans le fond de la masse. »

« C'est ainsi que se meuvent les demi-liquides. C'est ainsi qui se meuvent aussi certains corps qui d'ordinaire ont les propriétés des corps solides – même cassants comme la poix[2] --, pourvu qu'une force suffisante agisse sur eux pendant un espace de temps suffisant. L'influence du temps consiste principalement en ce que la pression, insuffisante pour produire une séparation (*detrusion)* instantanée des molécules, les forcera, après un certain temps ; à glisser imperceptiblement les

[1] Forbes exposa ses idées dans une série de lettres parues dans le *Edinburgh New Philosophical journal* de 1842 à 1844. Ces lettres ont été reproduites dans un recueil, sous le titre d'*Occasional Papers*, qu'on ne trouve plus en vente. Les citations suivantes sont faites d'après son mémoire : *Illustrations of the viscous Theory of Glacier Motion*, paru dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society of London for the year 1846*, p. 192-210, où l'hypothèse apparaît dans la forme définitive que lui donna Forbes après quatre ans de polémiques et d'études. J'omets toute la partie qui concerne l'accélération du mouvement des glaciers en été.
[2] Voyez l'expérience de Gordon, citée dans le *Philosophical Magazine*, mars 1845. – L'expérience à laquelle Forbes fait allusion est celle-ci : un tonneau défoncé, de poix très dure et très cassante, -- ayant une cassure conchoïdale, -- avait été abandonné à Gateshead depuis quelque temps. La poix, *quoique restant solide*, s'écoulait en reproduisant les mouvements d'un glacier. « Elle restait cependant cassante pendant qu'elle s'écoulait », ajoute M. Gordon (*Phil. Mag.*, XXVI, 1845, p. 2017).

unes sur les autres et à rentrer dans de nouvelles redistributions de cohésion (*new atachments*), en sorte que le mouvement de la masse pourra s'opérer sans déchirements et qans qu'elle s'émiette en un tas de débris. »

C'est aussi de même que se meuvent les glaciers. « Le glacier, ajoutait Forbes, serait donc comparable à une rivière, dans laquelle l'élément de liquidité serait très faible, tandis que celui de cohésion ou de viscosité serait en excès. » Et, pour prouver que les solides, soumis à une certaine pression, sont vraiment capables de s'écouler comme des demi-liquides, il citait l'expérience de M. Christie sur le coulage de la glace solide par l'orifice d'une bombe pendant la congélation de l'eau qui la remplit ; et il signalait aussi une patente, dans laquelle l'inventeur disait que l'étain, soumis à une pression de vingt tonnes environ par pouce carré, « s'écoule conformément aux lois de l'écoulement des liquides ».

Voilà l'hypothèse de Forbes. Comme on le voit, elle semble déjà prévoir ces belles recherches de M. Tresca sur « l'écoulement des solides », qui viendront la confirmer trente ans plus tard et élargir nos conceptions sur cette vaste question de la physique moléculaire. Mais, à cette époque, le terme de « viscosité de la glace » souleva toute une tempête. Ceux qui jamais n'avaient vu dans la glace qu'un corps rigide, presque inflexible et cassant, furent scandalisés de cette viscosité que lui attribuait Forbes ; ils nièrent résolument la capacité de la glace de subir la moindre déformation permanente et préférèrent retourner à l'hypothèse du glissement des glaciers en bloc. La polémique s'engagea donc – on pourrait presque dire avec acharnement[3].

Parmi les adversaires de Forbes, il faut que je cite le mathématicien Hopkins. Les modifications que ses idées durent subir dans la controverse et l'influence qu'elles exercèrent plus tard sur M. Tyndall sont si manifestes, qu'elles méritent d'être mentionnées.

Hopkins, qui n'avait jamais vu les glaciers, commença par nier complètement leur plasticité et par soutenir la possibilité du glissement en bloc. Il fit des expériences pour le prouver. Un bloc de glace, posé sur une plaque de grés inclinée de 3°, glissait en effet avec une vitesse uniforme, non accélérée, de 8 millimètres à l'heure. Le glissement restait encore perceptible lorsque l'inclinaison n'était que de 0°40', si la plaque de grés était remplacée par une plaque de marbre, et sa vitesse augmentait lorsque le bloc de glace était chargé d'un certain poids[4]. Quant à la glace, elle serait, selon Hopkins, absolument dénuée de plasticité ; elle ne subit que des changements de forme temporaires, dans les limites de son élasticité ; mais elle est absolument incapable de subir des changements de forme accompagnés d'*extensions*. Dès qu'il y a extension, elle se fend, et les crevasses prennent une direction qui se détermine par les formules de tension maxima dans un corps élastique soumis à la déformation. Le fait même que ces formules s'appliquent à la glace est la preuve de sa non-plasticité[5].

Mais, comme les observations s'accumulaient pour démontrer que les glaciers ne glissent pas en un seul bloc, Hopkins eut recours à la supposition que le glacier se subdivise en tranches longitudinales, qui glissent les unes à côté des autres avec des vitesses différentes, ce qui permettrait aux glaciers de traverser les gorges et de se subdiviser à la rencontre des îlots,

---

[3] Ceux qui connaissent la terminologie usitée dans la mécanique de l'époque savent que le terme de viscosité s'employait alors (il s'emploie encore dans ce sens) pour désigner la résistance des liquides et demi-liquides au glissement de leurs particules. On appelait alors viscosité ce qu'on appela plus tard « résistance à la force tangentielle » et « résistance au cisaillement » (*resistance to the detrusive force, to the shearing*) ; et nous savons maintenant, après les expériences de M. Tresca et les calculs de M. Saint-venant, que cette résistance est encore la même que M. Tresca désigne sous le nom de « résistance ç la fluidité ». C'est précisément dans ce sens que devait la comprendre John Hershel, lorsqu'il conseilla à Forbes de prendre le mot de viscosité pour caractériser sa théorie. Ce terme était d'autant plus nécessaire que si le terme « demi-fluide » avait été appliqué aux glaciers sans l'épithète de « visqueux », il prêtait à un malentendu que Forbes tenait surtout à éviter. On appelait alors demi-fluides les corps *meubles*, comme le sable ou un amas de débris (demi-fluides ou terres ; *lockere oder halbflüssige Massen*), et Forbes tenait à faire bien comprendre que le glacier n'est pas un amas de débris qui coule comme les amas de terre de nos terrassements. On s'étonne donc de voir M. Tyndall demander si la glace ressemble à de la colle et si on peut la tirer en fils comme on fait en plongeant une cuiller dans du miel. Quand W. Thomson nous parle cependant, dans ses recherches sur l'hydrokinétique, se « la viscosité de l'eau et de l'air », s'agirait-il aussi de les tirer en fils avec une cuiller, et ne s'agirait-il pas plutôt de la résistance au glissement des molécules, très faible dans l'air, plus grande dans l'eau et dans les demi-liquides, et encore plus grande dans les solides ?

[4] *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XXVI ; *Athenœum*, 1843, n° 827. – Répétées récemment par M. Moseley, ces expériences ont donné le même résultat.

[5] Au fond, ces formules ne sont rien autre que les formules élémentaires de la théorie de l'élasticité, qui permettent de trouver la direction et la valeur du maximum de la force normale (compression ou tension) et de la force tangentielle (glissement), dans un prisme qui subit une curvature. J'ai montré ailleurs (*Mémoires de la Société de géographie de Russie*, t. VII) comment celles que l'on trouve dans chaque manuel de mécanique appliquée peuvent prendre la forme de « la formule de M. Hopkins » :

$$\text{Tang } 2\,(V,q) = -\text{Cotang } 2\,(U,q) = \frac{2X}{Pq}$$

et donner la valeur numérique des forces. Il faut se souvenir, d'ailleurs, que ces formules, qui sont vraies pour un corps élastique, cessent de l'être, dès qu'il y a glissement des particules les unes sur les autres. C'est pourquoi Hopkins arrivait à des résultats numériques absolument différents, selon qu'il prenait un corps élastique ou une argile plastique : la direction des crevasses variait de 30°.

et expliquerait en même temps la vitesse plus grande des parties médianes. Comme on prouva bientôt à Hopkins que le glacier ne montre pas la moindre trance d'une pareille subdivision par une série de crevasses longitudinales, il admit alors que les crevasses ne sont pas de rigueur : il pourrait exister des « plans de glissement » sans solution de continuité. Une ligne droite, tracée transversalement sur le glacier, accuserait cependant cette subdivision en se transformant en une ligne échelonnée[6]. Il défiait ses adversaires de prouver qu'une ligne droite se transforme en une ligne courbe, et niait absolument que, dans une section verticale du glacier, les parties supérieures fussent douées d'une vitesse plus grande que les parties inférieures. Si ces faits étaient prouvés, disait-il, ils suffiraient pour admettre d'emblée la plasticité de la glace. L'un et l'autre furent prouvés, en effet, l'été suivant, par Ch. Martins et Forbes[7]. Alors Hopkins finit par admettre que la glace avait bien un certain degré de plasticité, mais de *plasticité séculaire*, qui ne se manifeste qu'après un certain laps de temps très long et qui ne suffit pas pour expliquer les changements de forme rapides des glaciers. De concession en concession, Hopkins eût été forcé, comme l'a très bien dit Whewell[8], d'admettre la plasticité de la glace comme cause du mouvement des glaciers, « puisqu'il est étrange d'appeler séculaire une plasticité qui se manifeste en quelques jours, l'élément temps étant d'ailleurs nécessaire pour toute plasticité ». – « Malheureusement, ajoutait Whewell, l'histoire des sciences nous enseigne que le passage de l'erreur à la vérité ne se fait pas toujours par cette voie si simple. »

Cette remarque de l'auteur de l'*Histoire des sciences inductives* trouva sa confirmation vingt ans plus tard, lorsque M. Tyndall, reprenant l'œuvre de Hopkins, vint nier de nouveau la plasticité de la glace comme cause suffisante du mouvement des glaciers.

III.

On connaît assez l'hypothèse de M. Tyndall, tant de fois reproduite dans ses ouvrages et conférences populaires. On connaît aussi sa critique de l'œuvre de Forbes. Et cependant, lorsqu'on a relu tout ce que M. Tyndall a publié sur ce sujet et lorsqu'on a pris en considération la manière dont il a mitigé l'absolu de ses premières affirmations, on se trouve bien embarrassé de résumer son hypothèse. Je préfère donc l'exposer en citant les paroles mêmes de l'auteur[9].

« En vertu de quelle propriété – se demande-t-il après avoir décrit le mouvement des glaciers, -- en vertu de quelle propriété la glace peut-elle se mouler ainsi et modifier ses formes, comme nous l'avons décrit dans les observations précédentes ? La seule théorie qui mérite encore notre attention est la théorie bien connue de la viscosité de la glace. Beaucoup de phénomènes, comme nous l'avons vu, semblent à première vue témoigner en effet que la glace est un corps visqueux, ou « demi-liquide » et, comme tel, s'écoule dans les vallées des Alpes. Cependant cette théorie est tellement en contradiction avec notre expérience journalière de la glace, qu'il nous reste toujours un doute sur sa justesse.

« Ne pourrait-on pas cependant reproduire les mêmes phénomènes sans l'intervention de cette théorie ? » -- C'est possible, en effet, -- et M. Tyndall décrit ses expériences sur la regélation. Ces phénomènes, continue-t-il, nous font supposer que si nous prenions un parallélépipède de glace, si nous le mettions dans un moule de prisme courbé et si nous exercions sur lui une certaine pression, il serait brisé en morceaux ; mais la même force mettrait les débris en contact, et ils se ressouderaient, en sorte que la continuité de la masse serait de nouveau rétablie. L'expérience le confirme ; un morceau de glace ayant la forme d'un prisme droit s'est transformé en un prisme courbé, aussi entier que le premier, et la modification s'est opérée, non pas en vertu d'un mouvement visqueux des particules, mais en vertu du *broiement et de la regélation*. Si le changement de forme s'opérait assez lentement, nous recevrions la reproduction fidèle de ce qui s'opère dans chaque coupe transversale du glacier. Ainsi tous les faits du mouvements des glaciers sont mis, par les expériences précédentes, en harmonie avec une propriété de la glace[10]. »

Après avoir cherché à prouver que « l'essence de la viscosité » est la faculté de céder à la tension, et que la glace ne possède pas cette propriété, M. Tyndall conclut en ces termes :

« En résumé, nous avons donc deux genres de faits : les uns en harmonie avec l'idée de viscosité, les autres aussi contraires à cette idée que possible. Là où nous avons pression, nous avons la première série ; là où l'extension est en jeu, nous avons la deuxième série. Mais les deux peuvent être mis d'accord par cette hypothèse – ou plutôt par cette vérité établie –

---

[6] *On the Mechanism of the Motion of Glaciers, 2d letter*, dans le *Phil. Mag.*, t. XXVI, p. 165.

[7] J. Forbes, *Thirteenth letter on glaciers*, dans *Edinburgh New Philosophical Journal*.

[8] *Philosophical Magazine*, même volume, p. 217.

[9] *In the Alps*, p. 312-315 de la traduction allemande.

[10] « Il est aisé de comprendre comment une substance pareille peut passer, en se comprimant, à travers les gorges étroites des Alpes, d'infléchir, … etc., *et tout cela sans présenter aucune trace de viscosité.* » *La chaleur, mode de mouvement*, traduction de l'abbé Moigno, 2e édition française, § 235.

que la fragilité de la glace et sa propriété de se ressouder lui permettent de subir des changements de forme sans solution de continuité. »

Enfin, l'exposé de l'hypothèse de M. Tyndall serait incomplet si je ne mentionnais pas qu'il maintient aussi, avec Hopkins, jusqu'à un certain degré, le glissement en bloc. Il s'exprime, du moins dans les *Glaciers of the Alps* (§ 13 et conclusions), en ces termes :

« La théorie de Saussure, il faut bien s'en souvenir, correspond jusqu'à un certain point à la vérité. Outre le coulage du glacier, toutes la masse glisse en bloc dans son lit incliné. » Et, pour preuve, il répète l'argument de Hopkins (3e lettre, p. 247) : « Les rochers striés de l'Angleterre portent encore des traces de ces puissants mouvements. » Il maintient enfin jusqu'à un certain point le mouvement visqueux de la glace et en profite pour expliquer « la structure veineuse ». Mais il ne donne à cette propriété qu'une importance tout à fait secondaire, et lorsque Forbes cite son expérience sur une masse demi-liquide qui s'écoule dans une auge inclinée et la compare à un glacier, il s'écrie : « Voilà qui est bien précis ! Eh bien, mon opinion, non moins précise, est que jamais aucun glacier ne présenta de conditions mécaniques semblables à celles que nous voyons dans cette expérience. » (*Glaciers of the Alps*, §22, note.)

Chose remarquable, malgré l'immense popularité dont jouit à juste titre tout ce qui sort de la plume de M. Tyndall, malgré ses brillantes expériences et ses nombreux écrits qui ont mis son hypothèse à la portée de tout le monde, elle n'a pas trouvé le même accueil que les autres travaux du brillant physicien anglas. « La théorie du brisement et du regel » a eu un moment de succès, mais son apparition n'a pas apporté une solution définitive de la question. Les hypothèses sur la cause du mouvement des glaciers se sont succédé depuis, les recherches se sont multipliées et, loin de considérer les conclusions de M. Tyndall sur la non-plasticité de la glace comme décisives, c'est plutôt à les réfuter que travaillent aujourd'hui les expérimentateurs.

En effet, l'hypothèse de M. Tyndall ne laisse pas de soulever des doutes sérieux. Que la regélation soit un agent puissant pour cicatriser les crevasses nombreuses qui se forment sur les bords d'un glacier et partout où il y a brusque changement de vitesse, -- nul doute possible à cet égard. La découverte de Faraday demeure un fait acquis. Mais que le broiement et la regélation soient la cause du mouvement plastique des glaciers, -- voilà ce qui reste encore à prouver. S'il s'agit d'un broiement effectif de la glace, tel que nous le voyons dans les expériences de M. Tyndall, on n'en trouve pas la trace dans les glaciers. La « glace saine » qui constitue la grande masse du glacier n'est pas brisée en morceaux ; elle n'est même pas fendillée. Et cependant cette glace saine change de forme à chaque instant ; elle se moule, se prête aux mouvements différentiels, elle coule comme un demi-liquide. – S'agit-il au contraire d'un brisement « sans déchirures grossières », d'un broiement « sans solution de continuité » (ce sont les expressions que M. Tyndall emploie dans ses récents ouvrages), on se demande ce que pourrait bien être un brisement sans solution de continuité, et si cette espèce de brisement, qui n'en est pas un, ne serait pas ce même glissement des particules les unes sur les autres, *without a bruise*, dont parlait Forbes.

Il est certain qu'un bloc de glace peut être broyé en mille morceaux qui se ressoudent ensuite sous la pression, et que de cette manière on peut brusquement le faire changer de forme ; mais M. Tyndall n'a jamais prouvé que les lentes modifications de forme dans les glaciers s'opèrent aussi de cette manière. Un morceau d'argile plastique, soumis brusquement à une déformation, se déchire aussi ; il peut être aussi réduit en mille morceaux, que le potier ressoude ensuite sous la pression de ses doigts ; mais il ne s'ensuit pas qu'une masse d'argile plastique, abandonnée à elle-même, ne puisse pas s'écouler dans un lit incliné selon les lois de l'écoulement des liquides.

La question reste donc toujours la même depuis quarante ans : « Les glaciers étaient plastiques, cette plasticité est-elle due à la plasticité de la glace ? Si oui, -- cette propriété n'est-elle pas en contradiction avec la dureté et la fragilité bien connues de ce corps ? » C'est toujours cette question qu'il s'agit de résoudre, et pour cela, ce me semble, il est temps d'appliquer au problème qui nous occupe les résultats des remarquables recherches de M. Tresca sur *l'écoulement de solides*.

C'est ce que je vais faire. Mais, avant d'aborder ce sujet, qu'il me soit permis de discuter un calcul de M. Tyndall, destiné à prouver que la glace, si elle possède un certain degré de plasticité très minime, le possède à un degré absolument insuffisant pour expliquer le mouvement plastique des glaciers.

Pour prouver cette assertion, M. Tyndall prend deux pieux, A et B, enfoncés dans la mer de Glace sur une ligne transversale à son écoulement. Le premier est planté près du bord du glacier, et le second à 53 mètres de côté qui serait formé avec deux autres pieux plantés chacun à 53 mètres plus bas que les pieux A et B. Si le mouvement de descente du glacier était uniforme, les quatre sommets du carré descendraient en vingt-quatre heures de la même unité de longueur : le carré ne serait pas déformé. Mais, en vertu du ralentissement des bords du glacier, le pieu A n'avance que de 254 millimètres en vingt-quatre heures, tandis que B avance de 375 millimètres. Admettant alors que les deux autres sommets du carré avancent avec la même vitesse que les sommets correspondants A et B, sans s'éloigner de la normale, M. Tyndall en conclut qu'au bout de vingt-quatre heures le carré imaginaire se transformerait et losange. Dans ce cas, le plus grand allongement des dimensions du carré serait dans la direction d'une de ses diagonales. Cet allongement serait, en une heure,

de 44 millionièmes de la diagonale. Identifiant cet allongement avec la tension qui se serait manifestée le long de la diagonale, M. Tyndall conclut en ces termes : « Eh bien, cette tension si minime, la glace ne peut pas la subir : elle se déchire. » (*Glaciers of the Alps*, § 18.) La plasticité ou la viscosité presque nulle de la glace se trouve ainsi démontrée.

Ce calcul n'est-il pas cependant un peu trop sommaire, lorsqu'il s'agit de déterminer, pour ainsi dire, les limites numériques d'une propriété physique de la glace ? Je ne dirai pas que l'*allongement*, fait purement géométrique, ne devrait pas être identifié avec la *tension*, fait mécanique. Pour M. Tyndall, qui présuppose, comme Hopkins, que la glace ne possède qu'à un degré infinitésimal la liberté de glissement des molécules, cet argument n'aurait pas de valeur[11]. Mais ne pourrait-on pas se dire aussi que si l'un des deux sommets imaginaires du carré s'éloignait de la verticale, ne serait-ce que de deux centimètres, la *tension* ou plutôt l'allongement de la diagonale serait déjà, ou bien quadruple de ce que reçoit M. Tyndall, ou bien même négatif ; or c'est précisément ce qui arrive, et dans une proportion bien plus considérable. La descente d'un jalon ne se fait pas selon une normale à la ligne transversale, et nous voyons dans les mensurations de M. Reilly deux pieux séparés de 27 à 30 pieds, tantôt s'éloigner d'un demi-pouce, tantôt se rapprocher de deux pouces. Pour donner la moindre valeur à son calcul, M. Tyndall aurait donc dû prendre quatre pieux, au lieu de deux, et mesurer leurs quatre distances.

D'autre part, un ingénieur se demandera aussi s'il est prudent de déterminer une constante (disons la « résistance temporaire » d'un corps) sur un prisme de 53 mètres, ou plutôt de 77 mètres de longueur, lorsque le corps est aussi peu homogène qu'un glacier. Ne serait-il pas probable, en effet, qu'en vertu de manque d'homogénéité, il se produisît des tensions locales qui seraient 20, 100 fois plus grandes que la moyenne, et ce seraient ces tensions qui produiraient les déchirements de la masse ? Et c'est encore ce qui arrive en effet. Si MM. Mathews et Reilly, lorsqu'ils étudiaient les mouvements différentiels du glacier de Bionnassé, s'étaient bornés à mesurer la marche de deux jalons éloignés de 150 pieds (le premier et le sixième de leurs mesures citées à la page 418), ils auraient reçu un allongement (une tension selon M. Tyndall) de 1/10000000 par heure ; et s'ils se trouvait des crevasses sur cet espace, nous en déduirions, selon la méthode de M. Tyndall, que la glace ne supporte pas même des tensions aussi minimes sans se lézarder. Mais, puisque, M. Reilly distançait ses pieux de 30 pieds, il résulte de ses mesures que la glace supporte des allongements cent trente-huit fois plus rapides que ceux reconnus impossibles par M. Tyndall. Et quand on applique le même calcul aux mesures faites en espaçant les jalons de deux pieds seulement, on trouve que la glace supporte, sans se crevasser, des allongements *six cent soixante-dix fois plus rapides*.

Je me demande si je dois après cela mentionner un autre calcul de M. Tyndall, fait toujours pour prouver l'inextensibilité de la glace ; il est encore moins concluant que le précédent. M. Tyndall, en effet, prend une ligne de jalons qui coupe transversalement la mer de Glace, et qui a un demi-mille environ, 800 mètres de longueur. Au bout de vingt-quatre-heures, en vertu de l'accélération des parties médianes, la ligne droite se transforme en une courbe qui est de 1/80e de pouce plus longue. L'allongement serait donc de 4/10000000 en vingt-quatre heures, moins de 2/100000000 en une heure. Et, comme la mer de Glace se crevasse sur ses bords, M. Tyndall en conclut : « Si le glacier avait une propriété qui mérite tant soit peut-être nommée viscosité, il aurait certainement satisfait à cette modeste demande ; mais il ne le peut pas : au lieu de s'étendre sous cette faible tension, il se déchire comme un corps excessivement cassant, et nous voyons apparaître les crevasses bordières. » (*In den Alpen*, p. 318.) O il est évident que la moyenne de cet allongement ne donne absolument aucune idée des tensions *locales* qui produisent les crevasses bordières : celles-ci, comme l'a déjà remarqué M. John Ball, peuvent être, et elles le sont en effet, incomparablement plus grandes que la moyenne. Quant à la glace, elle supporte sans se lézarder, comme nous venons de le voir pour les glaciers, et comme nous allons le voir tout à l'heure pour des blocs de glace, des allongements permanents cinq à dix mille fois plus rapides.

Ceci dit, passons aux observations de M. Tresca.

IV.

Quelques considérations préliminaires, dans lesquelles je me laisse guider par l'excellent rapport de M. Morin[12], feront mieux ressortir les rapports entre les recherches de M. Tresca et la question qui nous occupe. Elles aideront en même temps à dissiper quelques erreurs de langage qui se sont introduites dans la discussion.

Si l'on suspend une bande de caoutchouc par l'un de ses bouts, en attachant un certain poids à l'autre bout, la bande subit une déformation. Elle s'allonge dans le sens de sa longueur, tandis que ses dimensions transversales se rétrécissent. Mais cette déformation n'est qu'une déformation *temporaire*. Si elle n'a pas dépassé certaines limites (celles de l'élasticité parfaite

---

11 Hopkins l'a fort bien prévu cependant. C'est pourquoi en faisant ce calcul (dans lequel M. Tyndall ne fait que substituer ses mesures à celles de Forbes), il ne le considère nullement comme une mesure de la plasticité de la glace. Il se borne à dire que les tensions près des bords du glacier sont trente à quarante fois plus grandes que dans le centre (*Philosophical Magazine*, t. XXVI, p. 167).

12 Rapport sur le mémoire de M. Tresca, sur le poinçonnage des métaux ; *Comptes rendus*, t. LXX, 1870.

du caoutchouc) et si elle n'a été que de courte durée, la bande reprend presque exactement sa forme primitive. Et si nous analysons comment la déformation s'est faite, nous trouvons que l'allongement correspondait à une *extension* du corps, tandis que le rétrécissement correspondait à une *compression*. Il y a eu écartement des molécules dans un sens et rapprochement dans un autre ; l'équilibre s'est rétabli cependant dès que la force extérieure a été éloignée.

Il en est de même pour un bloc de caoutchouc, d'ivoire ou de tout autre corps plus ou moins élastique, qui serait soumis à une pression au lieu d'une extension, pourvu que le déformation ne dépasse pas non plus les limites de l'élasticité parfaite du corps comprimé. Le corps s'aplatit dans une direction et s'élargit dans les autres ; mais il revient à sa forme primitive dès que la force extérieure est éloignée. Ici encore il y a *extension*, ou écartement temporaire des molécules (ou particules), dans les directions où il y a allongement des dimensions ; et il y a *compression*, ou rapprochement des molécules, là où il y a raccourcissement. Il en est de même, enfin, pour un bâton que nous plions sur le genou – toujours dans les limites de son élasticité parfaite. Il y a tension sur la courbe convexe et compression sur la courbe concave.

Ces déformations, la théorie de l'élasticité les connaît sous le nom de déformations *temporaires* ou élastiques. Elles se font toujours par la voie de l'écartement et du rapprochement temporaire des molécules ; car, quelle que soit la force extérieure, extension, pression ou flexion, il y a toujours *tensions* et *compression* en même temps. C'est comme dit M. Morin, la première phase, dans laquelle les déformations sont proportionnelles à la forme déformatrice.

Si la forme extérieure augmente encore, l'élasticité du corps commence à disparaître : il ne revient plus entièrement à sa forme primitive ; les déformations sont, d'une part, la conséquence de l'écartement et du rapprochement des molécules, c'est-à-dire qu'il y a encore tension et compression ; mais à côté nous voyons se produire une déformation *permanente*, qui est le résultat du glissement des molécules ou particules les unes sur les autres. C'est la deuxième phase, dans laquelle les déformations ne sont plus proportionnelles à la force déformatrice : elles prennent les devants.

Enfin, si la force augmente encore et atteint ce que M. Tresca appelle le *coefficient de fluidité*, nous avons la troisième phase. Le corps ne change plus de volume ; il devient presque incompressible comme un liquide. L'écartement et le rapprochement des molécules ne se produisent que dans des limites presque infinitésimales. Les déformations élastiques ou temporaires, accompagnées de tensions et de compressions, n'existent plus ; elles sont déjà *permanentes* et se font seulement en vertu du glissement ou du roulement des molécules. Le corps obéit à la loi hydrostatique de transmission de la force dans toutes les directions, seulement avec une certaine perte. Enfin la résistance aux déformations devient constante, et le travail nécessaire pour produire une certaine déformation est égal à la somme des volumes perdus et acquis dans les directions perpendiculaires à la direction de la force (qu'elle soit pression ou traction) multipliés par un coefficient – le *coefficient de fluidité*. Nul ou presque nul dans l'eau, il est de 130 kilogrammes environ par centimètre carré pour le plomb, de 3800 kilogrammes environ pour le fer.

Ces conclusions, M. Tresca les déduit d'une série d'expériences les plus variées, qui durent déjà depuis vingt ans, et dont voici les plus caractéristiques. Il prend, par exemple, un bloc cylindrique ou bien un paquet de rondelles de plomb. Il les met dans un vase cylindrique en métal, à fortes parois, dans le fond duquel on a ménagé un orifice circulaire. Soumis à une forte pression, le plomb sort par l'orifice sous forme de jet et reproduit toutes les lois de l'écoulement des liquides. Lorsqu'on coupe ensuite le plomb et son jet d'une coupe longitudinale, on voit que l'écoulement s'est produit par l'affluence des molécules venant de toutes les parties du vase et décrivant des courbes en éventail, pour venir s'engouffrer dans l'orifice. On étudie ainsi sur le plomb les lois de l'écoulement des liquides, mieux qu'on ne pourrait le faire sur un liquide, toujours trop mobile.

Ou bien M. Tresca pose un bloc de plomb ou de fer sur un marbre et l'écrase en le soumettant à une forte pression. Le bloc s'épanche de tous côtés comme une argile plastique s'épancherait sous son propre poids. Les particules du plombe suivent chacune leur trajectoire indépendante ; elles s'épanchent en éventail comme les particules d'un liquide. Le frottement des molécules contre le marbre et contre la surface du piston qui écrase le plomb ralentit leur marche, comme ce serait le cas pour un demi-liquide ; et lorsque M. Tresca couvre la surface de ceux-ci de petites raies très fines, ces raies microscopiques facilitent déjà l'écoulement dans leur direction, tandis qu'elles le ralentissent dans la direction perpendiculaire. Le fer se comporte en cette occasion comme un morceau de cire ou d'argile plastique.

Enfin, pour compléter la série des phénomènes liquides, M. Tresca enfonce une tige de fer dans un bloc de plomb enfermé dans un vase cylindrique. Le plomb remonte dans la vase comme l'eau remonte dans un verre lorsqu'on y plonge un bâton, et en avant de la tige il se forme même cette *proue liquide* que nous trouvons devant un corps qui marche dans l'eau[13].

[13] Cf. *Mémoire sur l'écoulement des corps solides*, et *Mémoire sur le poinçonnage des métaux*, par M. Tresca, publiés dans le *Recueil des mémoires des savants étrangers*, ainsi que les nombreuses communications de M. Tresca, sur le même sujet, insérées dans les *Comptes rendus*.

Il est vrai que les expériences de M. Tresca ne portent que sur les métaux ductiles ou malléables : plomb, fer, acier non trempé. Mais peut-il y avoir le moindre doute que tout autre solide, quelles que soient sa dureté et sa fragilité, possède aussi – sinon au même degré, au moins au même titre, -- la liberté de glissement des molécules qui fait l'essence de ces phénomènes ?

N'avons-nous pas, en effet, la longue expérience des ingénieurs pour nous dire que tous les corps de la nature, sans exception, après avoir été soumis pendant un temps considérable à une certaine pression, insuffisante pour y provoquer des ruptures, mais agissant à la longue, finissent par acquérir des déformations permanentes ? Or, où il y a déformation permanente, il y a coulage ; il y a glissement des molécules conformément aux lois de l'écoulement des solides. En effet, l'acier trempé, la fonte, de même que le fer ou le bois de nos ponts, finissent par acquérir à la longue une curvature permanente. La pierre la plus dure « se tasse » sous le poids de nos édifices : elle s'aplatit, s'étend horizontalement somme le bloc de plomb de M. Tresca. Et, sous la pression séculaire de nos rochers, les fossiles s'écrasent et se tordent, et le quartz lui-même se comporte comme un corps plastique. Une moitié de tel galet de quartz finit par glisser en bloc sur l'autre moitié, sans qu'il y ait solution de continuité : il n'y a que cisaillement[14]. Et même les corps les plus cassants, comme l'acier trempé et le verre, n'échappent pas à la loi générale. Un bâton de verre et une lame d'acier – nous dit M. Poncelet[15] – s'ils sont restés appuyés pendant longtemps contre un mur, finissent par acquérir une curvature permanente, comme un bâton de cire. Ils ne reviennent plus à leur forme primitive : donc il y a eu redistribution et glissement des molécules pour produire les allongements et les raccourcissements qui accompagnent toute déformation.

La glace serait-elle donc une exception à la règle ? Ou bien, possède-t-elle cette propriété dans une mesure trop minime pour expliquer le mouvement de glaciers ? – C'est l'opinion de M. Tyndall ; voyons cependant ce qu'en dit l'expérience.

V.

Tous les corps de la nature possèdent la propriété de subir des déformations permanentes, sans se fracturer, pourvu que ces déformations s'opèrent avec une lenteur convenable ; et comme la glace, de l'aveu de tous les physiciens, jouit aussi de cette propriété, jusqu'à un certain point, toute la controverse se ramène donc à ces deux questions : 1° avec quelle rapidité les déformations d'opèrent-elles dans les glaciers ? 2° quel est le degré de plasticité de la glace ? – S'il est prouvé que la plasticité dont jouit la glace, à des températures que nous rencontrons dans les glaciers, peut satisfaire aux déformations des glaciers dans leurs lits, nous avons alors dans la plasticité de la glace une cause *suffisante* pour expliquer ces mouvements ; sinon, nous devrons en chercher une autre.

Pour répondre à la première question, nous avons un si grand nombre de mensurations exactes qu'il y a plutôt embarras de choix. Je prends les mesures très précises de M. Reilly, faites en 1870, et celles de Forbes, qui datent de 1846[16].

On sait que deux pieux, plantés dans un glacier à 2, 3, 10 mètres de distance l'un de l'autre, sur une ligne transversale à la marche du glacier, parcourent en une heure des distances différentes. Or il résulte des mensurations susdites que ces différences de vitesse de deux pieux distancés de 2 pieds (60 centimètres) ne sont *au maximum* que de 1/215 à 1/125 de leur distance. Généralement elles ne sont que de 1/1000 à 1/2000 et même de 1/7000. Ces différences de vitesse, calculées d'après la méthode de M. Kopkins, correspondent à des maxima de déformation (allongement des diagonales) de 3 à 50 millionièmes en une heure. Une fois seulement sur 60, elles atteignent 98 millionièmes chez M. Reilly et 145 millionièmes chez Forbes (1 fois sur 45).

Il suffirait donc que la glace possédât la propriété de subir nue déformation correspondant à 145 millionièmes de sa longueur en une heure pour expliquer déjà le phénomène essentiel des glaciers – qui les fait ressembler aux rivières – l'accélération des parties médianes et le ralentissement du mouvement des bords. Il est vrai que, sur les bords mêmes, il peut se produire des tensions locales et même des chocs (brusques échanges de vitesses) bien plus considérables, et M. Ball suppose avec justesse que ces tensions locales peuvent être en certains points du glacier dix mille fois plus grandes que la moyenne. Dans ces occasions-là, la glace re rompra, se lézardera. Mais ce ne sont pas les crevasses qu'il s'agit d'expliquer, c'est surtout le mouvement plastique du glacier non crevassé.

Voyons maintenant quelles déformations la glace peut supporter sans se briser ? Si nous voulions nous borner aux procédés de M. Tyndall, nous aurions simplement à répondre que la glace supporte parfaitement les déformations que je viens de mentionner sans se fendiller. Pendant les six jours que duraient les mensurations de Forbes, pendant les vingt jours que

---

[14] Cf. *Introduction à la mécanique industrielle*, etc., par M. Poncelet ; *Résistance des matériaux*, par M. Morin ; les recherches de Rennié dans les *Philos. Transactions*, de 1829 ; *Recherches sur l'élasticité*, par Wertheim, etc.
[15] *Introduction de la mécanique*, 3e édition, annotée par Kreitz.
[16] W. Mathews, *On Canon Moseley's views upon Glacier Motion, Philos. Magazine* (IV), t. XLII, p. 415. – Forbes, *Illustrations*, etc. dans les *Philos. Trans.*, 1846, partie II, p. 171.

duraient celles de M. Reilly, la glace ne se fendait pas. Nous pourrions donc dire, toujours en suivant la méthode de M. Tyndall, que la glace supporte des allongements au moins 45000 à 75000 fois plus grands que ceux qui furent déclarés impossibles par le physicien anglais, et que cette minime plasticité suffit pour expliquer l'écoulement des glaciers.

Mais pourquoi ne pas faire aussi des expériences directes sur la glace ? – C'est le raisonnement qu'a tenu le professeur Bianconi. Mail il était arrêté par l'affirmation catégorique de M. Tyndall, qui niait jadis que la glace puisse subir des changements permanents. – Il est vrai, dit M. Bianconi, que M. Tyndall affirme que « les expériences les plus délicates sur la propriété qu'aurait la glace de céder à la traction, de s'étendre comme la mélasse, le miel et le goudron, n'ont pas réussi à la montrer douée de cette faculté ». (*Chaleur*, § 230.) « La science, continue le professeur de Bologne, impose ainsi silence à toute discussion ultérieure sur la plasticité et la flexibilité de la glace ; et cependant je ne pouvais m'astreindre à croire que le dernier mot fût déjà prononcé sur ce sujet et que les affirmations si positives de Forbes fussent dénuées de tout fondement.[17] »

M. Bianconi se décida donc à faire des expériences et l'audace du professeur bolonais fut largement rétribuée par les brillants résultats auxquels il arriva. Il prenait des planches de glace, artificielle ou naturelle (faite de neige comprimée), et les posant sur des supports par les deux bouts, il les faisait plier comme des planches de cire. La courbure permanente d'une planche de 1^{m},50 de longueur, 30 centimètres de large et 10 centimètres d'épaisseur, accusait une flèche de 23 centimètres. Puis, retournant la planche, M. Bianconi la redressait d'abord, puis la faisait se recourber dans une direction contraire. Enfin, attachant deux leviers à ses deux bouts, il la tordait comme une planche de cire, et tout cela se faisait sans qu'il y eût la moindre trace de fendillement (la gravure qui accompagne le mémoire et qui représente cette planche tordue en dit plus sur la plasticité de la glace que des pages de calculs comme ceux que j'ai mentionnés). Et cependant la glace, pendant quelle subissait toutes ces déformations, restait cassante, et il suffisait du moindre choc maladroit pour la faire voler en éclats. « Toutes ces déformations, concluait M. Bianconi, sont le résultat des mouvements intérieurs des molécules, particules et granules de la glace. C'est un phénomène analogue à la flexibilité des calcaires, dolomies, etc., dans lesquels la regélation n'a évidemment rien à voir. »

Toutes ces expériences étaient faites à des températures au-dessus de zéro jusqu'à +5°. Mais nous avons aussi des expériences faites à des températures plus basses, notamment celles de MM. Mathews et Froude[18]. Ils prennent une planche de 2^{m},10 de longueur, 165 millimètres de largeur et 35 millimètres d'épaisseur, et, la posant par ses bouts sur deux supports, ils l'abandonnent à son propre poids, exposée à des températures de – 1° à – 3°. Au bout de vingt-quatre heures, la planche a déjà une curvature permanente, dont la flèche est de 44 millimètres ; deux jours plus tard, la flèche est de 79 millimètres pour la surface supérieure, et de 94 millimètres pour la surface inférieure. La glace reste cependant compacte, sans la moindre fissure.

M. Moseley a répété la même expérience[19] également à des températures « considérablement au-dessous de zéro ». Sa planche de 13 millimètres d'épaisseur, posée sur des supports distancées de 91 centimètres et chargée d'un poids au milieu, s'infléchissait au bout de quelques heures de 13 millimètres et gardait une curvature permanente de 5 millimètres. Elle n'était pas du tout fissurée et offrait « une belle surface lisse et brillante ».

Or, connaissant la distance entre les supports, l'épaisseur de la planche et la grandeur de la curvature acquise, il est facile de calculer la différence entre les arcs extérieur et neutre (celui qui passe par le milieu de la planche) et, partant, l'allongement subi par chaque ligne de la surface convexe de la planche (l'extension de Tyndall). Il est de 40 à 45 millionièmes par heure dans les deux expériences citées et de 1283 millionièmes dans une seconde expérience de M. Mathews, où il se produisait déjà des déchirures dans la glace. Quant à l'expérience de M. Bianconi, elle donnerait des allongements de 37200 millionièmes en quelques heures, ce qui dépasse ainsi largement la plus grande rapidité des déformations que l'on ait jamais observées dans les glaciers.

Sans attacher, d'ailleurs, plus d'importance qu'ils ne méritent à ces calculs approximatifs, nous pouvons dire ainsi que les inflexions des planches se produisent avec une rapidité autrement grande que celle des glaciers, et que si nous imaginions, avec M. John Ball, le glacier comme composé de planches mises de champ, la plasticité de la glace qui ressort des expériences précédentes serait amplement suffisante pour expliquer tout le mouvement plastique des glaciers, et notamment l'accélération de leurs parties médianes. Nous voyons, en outre, que la force capable de produire ces déformations peut être très faible, puisque les planches s'infléchissent assez rapidement sous leur propre poids. Ceci ayant été mis en doute par M. Moseley et servant même de base à son hypothèse (*crawling theory*), il importe d'entrer dans quelques explications à ce sujet.

---

[17] *Esperienze intorno alla flessibilità del ghiacco*, dans les *Memorie della Accademia delle scienze dell'Instituto di Bologna*, 1871, *séria* III, t. Ier, p. 155-166. Le travail de M. Bianconi date de 1866 et 1867.

[18] *Nature*, t. Ier, Londres, 24 mars 1870.

[19] *Philosophical Magazine*, 4e série, t. XLII, 1871, p. 146.

Lorsqu'il fut démontré par les expériences précédentes que la glace peut très bien subir des déformations permanentes, M. Moseley s'empressa de déterminer la valeur numérique de la force nécessaire pour produire ces déformations. Autrement dit, M. Moseley essaya de déterminer le coefficient de cisaillement (*shearing force*) de la glace, qui n'est autre (comme l'a démontré M. Saint-Venant) que le « coefficient de fluidité » de M. Tresca.

Pour déterminer ce coefficient, M. Moseley prend deux blocs de bois qui s'ajustent très bien l'un à l'autre, et perce dans les deux un cylindre creux. Puis, immobilisant un des blocs dans une position qui maintienne horizontal l'axe de son cylindre, il dispose l'autre bloc de manière qu'il puisse glisser sur le premier, tout en conservant l'axe de son cylindre parallèle à l'axe du cylindre percé dans le premier bloc. Alors il met dans le double cylindre creux un bloc cylindrique de glace, attache un poids au second bloc de glace et produit ainsi le *cisaillement* de la glace. La partie du cylindre de glace emmanchée dans le bloc mobile glisse lentement sur l'autre partie, tout en restant soudée à elle ; si bien qu'au bout d'un certain temps, on reçoit un morceau de glace composé de deux cylindres parallèles, dont l'un a glissé sur l'autre ; mais les deux demeurent fortement attachés l'un à l'autre, de manière à ne former qu'un seul corps. Pas la moindre fissure n'atteste ce changement de forme : la glace reste absolument compacte, comme au début. La force de cisaillement se déduit facilement de cette expérience, et M. Moseley l'a trouvée de 4,5 à 8,4 kilogrammes par centimètre carré.

Cette valeur n'est pas déjà bien grande ; car, si le coefficient de fluidité de la glace n'est que de 4,5 kilogrammes par centimètre carré, il s'ensuit qu'il suffirait déjà d'une couche de glace de 50 mètres environ d'épaisseur pour produire un « écoulement ». Et cependant, cette valeur est encore trop grande. M. Mathews a déjà observé que lorsque la vitesse du cisaillement était moindre, le coefficient n'était plus que de 4,5 kilogrammes au lieu de 8,4[20] ; et dans les expériences des planches, où la déformation procède encore plus lentement, le coefficient de fluidité est encore plus petit : il n'atteint pas même 100 grammes par centimètre carré.

En effet, on sait, d'après les recherches de M. Tresca, que ce coefficient dépend essentiellement de la rapidité des déformations. Ainsi le coefficient de fluidité du fer, qui est de 3757 kilogrammes d'après M. Tresca, et de 3809 d'après M. Fairbairn[21], se trouve être trois à dix fois moindre pour les déformations lentes (expériences de M. Ardant sur la limite de résistance du fer), et il est encore moindre dans les déformations lentes de nos ponts. Il en est de même pour la glace, et nous pouvons dire maintenant, après les recherches de M. Pfaff, qu'à des températures voisines de zéro, la moindre pression – ne serait-elle que de 100 à 150 grammes par centimètre carré – suffit déjà pour faire de la glace un corps absolument plastique, s'écoulant comme la cire ou la poix.

VI.

L'idée mère des expériences de M. Pfaff[22] est de déterminer la pression minima capable de produire dans la glace des déformations permanentes. Il répète donc l'expérience des planches s'infléchissant sous leur propre poids et obtient les mêmes résultats. D'autre part, il prend des cylindres et des prismes de glace, les uns entiers, les autres creux, et les posant sur un bloc de glace, il les soumet à une certaine pression très faible. Les cylindres et les prismes pénètrent dans la glace comme les tiges d'acier pénètrent dans les pâtes céramiques de M. Tresca. Ainsi un cylindre creux, soumis à une pression de deux atmosphères seulement (2050 grammes par centimètre carré), s'enfonce dans la glace de 1 millimètre ¼ en douze heures, lors même que le thermomètre n'accuse que – 4° à – 1° au-dessous de zéro. Lorsque la température monte jusqu'à un demi-degré au-dessous de zéro, l'enfoncement avance déjà de 3 millimètres en deux heures ; et même avec une température de – 6° à – 12°, il continue à se produire sous une pression de cinq atmosphères, avec une vitesse de 1 millimètre en cinq jours.

Avec des températures de 2°5 au-dessus de zéro, l'enfoncement devient encore plus rapide ; le cylindre de fer, quoique couvert d'une épaisse couche de neige, pénètre dans la glace comme il le ferait dans de l'argile ; il suffit alors d'une pression de 1/19 d'atmosphère pour qu'il s'enfonce de 14 millimètres en trois heures.

M. Pfaff en conclut donc avec raison que « la moindre pression suffit pour écarter les particules de la glace, pourvu qu'elle agisse d'une manière continue, et que la température de la glace et du milieu ambiant soit rapprochée de zéro. La glace, dans les environs de son point de fusion, se comporte au fond *comme de la cire*. »

---

[20] Mathews, *On Canon Moseley's views upon Glacier-Motion*, dans le *Philos. Mag*, IVe série, t. XLII, 1871, p. 332 et 415.

[21] Expériences de MM. Fairbairn et Hodgkinson. Cf. Poncelet, *Introduction à la mécanique, industrielle, physique et expérimentale*, 3e édition, annotée par M. Kretz, p. 379, 381, 319, 325. Cf. aussi Weisbach, *Lehrbuch der Theoretischen und angewandten Mechanik*, t. Ier, p. 384.

[22] Dr. Fr. Pfaff, *Versuche über die Plasticität des Eisen, Poggendorff's Annalen*, Band 155, 1875, p. 169-174. Cf. *Nature* (anglaise), 19 août 1875.

Je devrais encore citer les remarquables expériences de M. A. Heim, professeur de Zurich, et du moins mentionner celles de M. Helmholtz sur l'écrasement plastique des cylindres de glace. Mais l'espace me manque, et il me tarde d'arriver aux conclusions.

Ne résulte-t-il pas, en effet, des expériences mentionnées et de tant d'autres que, loin d'être dénuée de plasticité, la glace se comporte au contraire, à toutes les températures, depuis – 12° jusqu'à + 5°, comme un corps éminemment plastique ? Elle se prête à toutes les déformations permanentes et jouit d'une mobilité parfaite de ses molécules qui se déplacent avec des vitesses différentes, suivant chacune sa trajectoire et obéissant aux lois de l'écoulement des liquides, des demi-liquides et des solides soumis à une forte pression.

Et comme dans chaque déformation, quelle qu'elle soit et quelle que soit la force qui la provoque, il y a toujours allongement de certaines dimensions et raccourcissements des autres (je ne dis pas extension et compression, puisque celles-ci n'existent pas dans les déformations permanentes ou ne sont plus qu'infiniment petites), ne devons-nous pas en conclure que la distinction que M. Tyndall a cherché à établir entre la glace soumise à la pression et celle qui subit l'extension ne se trouve pas confirmée par l'expérience ? Les allongements et les raccourcissements sont supportés les uns et les autres sans déchirures, pourvu que les uns et les autres soient assez lents. Dès qu'ils dépassent une certaine limite, dès qu'il y a brusque échange de vitesses, ou choc, la glace se brise, se fendille. C'est pour cela que les glaciers se couvrent de crevasses le long de leurs bords, et de *séracs* lorsqu'il y a brusque changement d'inclinaison de leur lit. Mais le corps le plus plastique, comme l'argile, et le liquide le plus parfait, comme l'eau, en font de même dans les mêmes conditions : l'argile se fendille aussi ; elle se crevasse si le potier lui fait subir un changement de forme trop brusque ; et l'eau se subdivise en gouttelettes dans les cascades. D'autre part, nous avons vu que les déformations qui se produisent dans les glaciers sont si lentes que la plasticité inhérente à la glace suffit amplement pour expliquer la marche des glaciers. Et le jour où l'on fera un modèle de glacier, avec un cirque chargé de glace soumise à une certaine pression, on verra certainement ce glacier en miniature s'écouler par sa vallée, sous toutes les températures, positives ou négatives, voisines de zéro, et sans l'intervention du brisement et du regel ou de la liquéfaction de M. Croll, mais seulement en vertu de sa plasticité. Et il suffira d'une faible élévation de température au-dessus de zéro pour voir les couches supérieures de ce glacier se ramollir et, devançant dans leur mouvement les couches inférieures, venir les surplomber, comme on le voit dans les glaciers des Alpes[23].

Plastique jusqu'à un certain point à toutes les températures qui ne s'abaissent pas au-dessous de – 10° à – 12°, la glace devient encore plus plastique lorsque sa température approche de son point de liquéfaction. C'est ce qui vient d'être confirmé par les recherches si intéressantes de M. Otto Petterson sur la dilatation de la glace, contenues dans le second volume, paru tout récemment, de l'œuvre scientifique du voyage de la *Véga*[24]. Chargé de rédiger la partie hydrographique de ce voyage mémorable, M. Petterson fait précéder son travail de déterminations précises du coefficient de dilatation de la glace, et il découvre le fait important que voici[25] :

Si la température de la glace est au-dessous de zéro, et si cette température s'élève, la glace se dilate comme tous les solides. Mais à l'approche de son point de fusion, son coefficient de dilatation diminue, et vers – 0°,25 il change de signe : au lieu de se dilater, la glace commence à se contracter, en se rapprochant ainsi jusqu'à un certain point de l'eau dont le volume à zéro, comme on le sait, est moindre que celui de la glace. Ceci est vrai pour la glace absolument pure ; mais la moindre impureté suffit pour que le même phénomène se produise bien au-dessous de zéro. Ainsi la glace qui contient seulement 15 cent millièmes de son poids de chlore commence à se contracter déjà à – 4°, et l'addition de 273 cent millièmes de chlore suffit pour produire le même phénomène à –14°. Mais toute la glace que nous trouvons dans la nature se trouve dans le même cas ; elle contient divers sels en dissolution ; elle doit donc subir la même loi et se contracter aux approches de son point de fusion. Or cette anomalie prouve à n'en pas douter que, bien avant d'avoir atteint son point de fusion, la glace *se ramollit jusqu'à un certain point*. « Le procès de fusion partielle, dit M. Petterson, doit être considéré comme commençant toujours au-dessous de zéro. » Remarquons en outre que cette conclusion se confirme par ce que nous savons sur tant d'autres solides qui se ramollissent aussi plus ou moins avant d'entrer franchement en fusion. L'étain devient cassant comme du verre par les gelées de Pétersbourg – remarquait M. Dumas, -- tandis qu'à nos températures ordinaires il est plastique sous une forte pression, et lorsque sa température approche du point de fusion, il se ramollit. De même pour un grand nombre de métaux, de même pour la glace.

---

[23] Le fait d'être *cassant* ne se trouve nullement en contradiction avec la plasticité. La glace reste cassante pendant qu'elle s'écoule comme un demi-liquide. – La fragilité de la glace ne dépend-elle pas de la petitesse de la *zone d'activité* de M. Tresca, si variable pour divers corps ?

[24] *Vega-expeditionens vetenskapliga iakttagelser, bearbetade af deltagare i resan och andra forskare, utgifna af* A.E. Nordenskjöld. Andra bandet.

[25] La *Revue scientifique* publiera prochainement une analyse détaillée de l'important mémoire de M. Petterson.

Cette observation importante nous permet d'expliquer un fait qui embarrassait Forbes : l'accélération des glaciers en été. Nous pouvons donc dire maintenant que la plasticité de la glace est suffisante à elle seule pour expliquer tout le mouvement plastique des glaciers. Quelque faible qu'elle soit à des températures très basses, elle suffit cependant, combinée à la forte pression des glaciers formidables du Nord, pour expliquer même le mouvement très lent des masses de glace du Groënland, qui ne s'arrêtent pas en hiver dans leur mouvement d'écoulement vers la côte. Elle n'en suffit que mieux pour expliquer l'écoulement des glaciers des latitudes modérées ; car si la pression dans ces glaciers est moindre, aussi leur température est-elle plus élevée, et la plasticité plus grande de la glace impure aux approches de son point de fusion suffit encore pour expliquer le mouvement plastique des glaciers des Alpes. Quant à l'accélération des glaciers en été, elle s'explique par le ramollissement encore plus grand de la glace à mesure que sa température approche de zéro.

Nous revenons donc au point de départ, à l'hypothèse de Rendu et de Forbes. Non seulement le mouvement des glaciers nous offre toutes les apparences de l'écoulement des rivières, mais il en reproduit les phénomènes jusque dans sa structure intime ; le glacier s'écoule comme une rivière *parce que* ses moindres particules se meuvent comme les gouttelettes d'un liquide obéissant, et dans la masse et dans chaque particule, aux lois de l'écoulement des solides.

Quant à la cause intime de la plasticité de tous les corps solides, quant à expliquer le rôle joué dans ces phénomènes par la pression et la température, ces problèmes rentrent déjà dans le domaine des théories sur la structure moléculaire des corps. Bornons-nous à envisager comme acquis ce point si essentiel pour la théorie des glaciers et de la période glaciaire, qui consiste à considérer la glace comme un corps éminemment plastique, à la plasticité duquel est dû l'écoulement des grands amas de glace. Le géologue qui étudie la période glaciaire appréciera toute la portée de cette manière de voir, si elle arrive à être généralement acceptée dans la science.

P. KROPOTKINE.